

УДК 551.583

## ОЦЕНКИ ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ ВАРИАЦИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ТИХОГО, АТЛАНТИЧЕСКОГО И ИНДИЙСКОГО ОКЕАНОВ В ТРОПИЧЕСКИХ ШИРОТАХ ПО ДОЛГОПЕРИОДНЫМ РЯДАМ ДАННЫХ

© 2017 г. И. И. Мохов<sup>1,2,\*</sup>, Д. А. Смирнов<sup>3,4,\*\*</sup>

<sup>1</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН  
119017 Москва, Пыжевский пер., 3  
\*E-mail: mokhov@ifaran.ru

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова  
119991 Москва, Ленинские горы

<sup>3</sup>Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН  
410019 Саратов, ул. Зеленая, 38  
\*\*E-mail: smirnovda@yandex.ru

<sup>4</sup>Институт прикладной физики РАН  
603950 Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

Поступила в редакцию 05.10.2016 г.

После доработки 09.12.2016 г.

Проведен сезонный трехкомпонентный анализ направленных связей (на основе “причинности по Винуеру–Грейнджеру”) между вариациями температуры поверхности в тропических широтах трех океанов – Тихого, Атлантического и Индийского, с которыми связаны значимые моды не только региональной, но и глобальной климатической изменчивости. Анализировались временные ряды ежемесячных индексов тихоокеанских процессов Эль-Ниньо – Южного колебания (ЭНЮК), экваториальной Атлантической моды (ЭАМ) и индоокеанского диполя (ИОД) и его западного и восточного полюсов для периода 1870–2015 гг. Построена схема взаимодействий исследуемых процессов, где наряду с оценкой силы связей представлены оценки знака коэффициента связи и сезона ее максимального проявления. В числе наиболее значимых выделены сезонные воздействия ЭНЮК на режим западного и восточного полюсов ИОД, режима восточного полюса ИОД на ЭНЮК, режима ЭАМ на ЭНЮК, режима ИОД на ЭАМ.

**Ключевые слова:** Эль-Ниньо–Южное колебание, экваториальная атлантическая мода, индоокеанский диполь, причинность по Винуеру–Грейнджеру, трехкомпонентный анализ.

DOI: 10.7868/S0003351517060046

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Климатические вариации в тропических широтах, связанные с аномалиями температуры поверхности океанов (ТПО), значимо влияют на климатический режим внетропических широт и земной климатической системы в целом [1]. При этом они сильно сказываются на экономике регионов, где проживает большинство населения планеты [2].

В тропиках Тихого океана (ТО) ключевой модой межгодовой изменчивости ТПО является квазициклический процесс Эль-Ниньо – Южное колебание (ЭНЮК), проявляющийся, в частности, в повышении ТПО в восточной и центральной областях с периодичностью в диапазоне 2–8 лет. С ним связаны сильнейшие межгодовые вариации

глобальной приповерхностной температуры [1]. От ЭНЮК зависит риск аномалий температурного, гидрологического и циркуляционного режимов в атмосфере не только в тропических широтах (см., например, [3–8]).

Аналог ЭНЮК в тропических широтах Атлантического океана (АО) – экваториальная Атлантическая мода (ЭАМ), проявляющаяся в вариациях ТПО в восточной части экваториальной Атлантики [9, 10]. При этом контрасты между восточной и западной областями в экваториальной Атлантике меньше, чем в Тихом океане, и характерные временные масштабы 2–4 года также меньше, чем для ЭНЮК. Отличие характеристик ЭАМ и ЭНЮК существенно связано с меньшей протяженностью

Атлантического бассейна в экваториальных широтах [10].

В тропических широтах Индийского океана (ИО) значимой модой, характеризующей разностью ТПО между западной и восточной областями бассейна, является так называемый Индоокеанский диполь (ИОД) с его западным (ИЗП) и восточным (ИВП) полюсами [11]. С этой модой связаны сильные региональные вариации осадков в тропических широтах. Эффекты климатических процессов в тропических широтах Атлантического и Индийского океанов проявляются и во вне-тропических широтах, хотя и менее значимо, чем эффекты ЭНЮК [2].

Климатическим процессам в тропических широтах, влияющим на глобальный климат, посвящено много исследований [1]. Особое значение имеют исследования роли различных факторов в динамике ТПО тропических океанов и взаимосвязи между ними [2, 12–24].

В результате проведенных исследований были получены достаточно противоречивые сведения о характере связей, например о направленности связи между ЭНЮК и ЭАМ. Одной из причин этого может быть то, что основными количественными средствами для характеристики связей были взаимные корреляционные функции и линейные регрессии анализируемых характеристик процессов на одновременные или предшествующие значения характеристик других процессов [12–14, 19, 23]. Эти подходы хороши для обнаружения статистической зависимости между процессами и часто достаточны при оценке односторонних связей. Однако их возможности весьма ограничены при исследовании взаимных воздействий (двунаправленных связей), не позволяя определенно ответить на вопрос о причинно-следственных связях, о силе взаимовлияния процессов (систем) [27–31].

В связи с отмеченными проблемами при анализе причинно-следственных связей целесообразно перейти от обычной взаимной корреляции между текущим значением одного процесса и будущим значением второго процесса к их условной (частной) взаимной корреляции [27–31]. Подходом такого рода является двухкомпонентный анализ причинности по Винеру–Грейнджеру, который основан на сравнении ошибок прогноза эмпирических авторегрессионных моделей при учете и без учета данных об одном процессе при прогнозе другого [32, 33].

Целесообразно дальнейшее развитие анализа направленных связей климатических процессов в тропических широтах трех океанов. В частности, в отмеченных исследованиях не учитывалась возможная сезонная зависимость сил связей

и свойств осцилляторов. В данной работе проводится систематическое исследование взаимосвязи указанных процессов на основе анализа причинности по Винеру–Грейнджеру с использованием трехкомпонентных авторегрессионных моделей и при учете возможной сезонной зависимости характеристик связи.

## 2. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И ИХ КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Климатические процессы в тропиках Тихого, Атлантического и Индийского океанов характеризовались индексами ЭНЮК, ЭАМ и ИЗП – ИВП – ИОД. При анализе использовались среднемесячные данные HadISST (<http://www.metoffice.gov.uk/>) для ТПО для периода 1870–2015 гг.

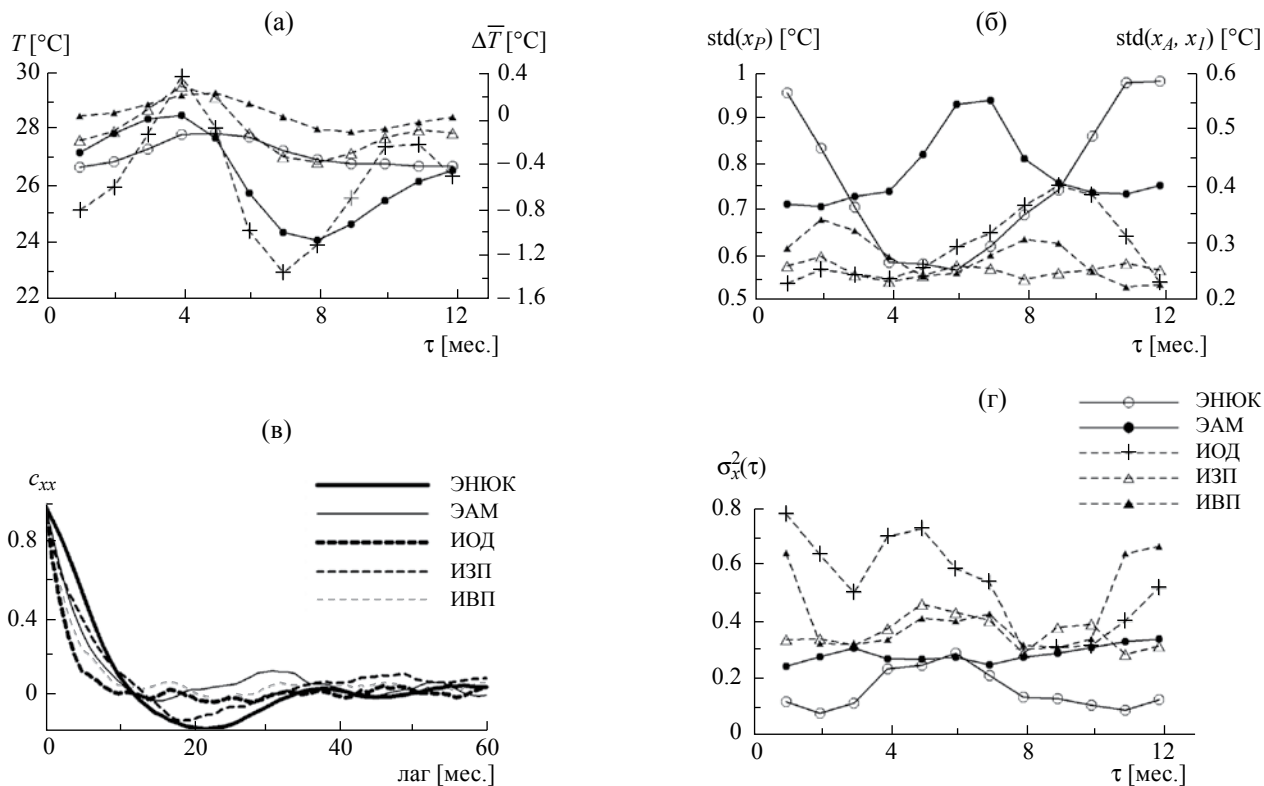
В качестве индикатора процесса ЭНЮК использовался индекс Ниньо-3.4, характеризующий аномалии ТПО в экваториальной области ( $5^{\circ}\text{N}–5^{\circ}\text{S}$ ,  $170^{\circ}\text{W}–120^{\circ}\text{W}$ ). Анализ был проведен и для индекса Ниньо-3 ( $5^{\circ}\text{N}–5^{\circ}\text{S}$ ,  $90^{\circ}\text{W}–150^{\circ}\text{W}$ ) с очень близкими результатами.

Для Атлантического океана использовался индекс ЭАМ (ТПО в области  $3^{\circ}\text{N}–3^{\circ}\text{S}$ ,  $0^{\circ}–20^{\circ}\text{W}$  в Атлантическом океане) аналогично [10]. Индекс ИОД характеризовался разностью ТПО между ИЗП (ТПО в области  $10^{\circ}\text{N}–10^{\circ}\text{S}$ ,  $50^{\circ}\text{E}–70^{\circ}\text{E}$ ) и ИВП ( $0^{\circ}–10^{\circ}\text{S}$ ,  $90^{\circ}\text{E}–110^{\circ}\text{E}$ ) аналогично [11]. Наряду с индексом ИОД анализировались индексы для двух его полюсов – ИЗП и ИВП.

При анализе рядов среднемесячных данных для ТПО с января 1870 г. по ноябрь 2015 г. (1751 месяц) удалялся годовой ход вычитанием средних значений для каждого месяца. Исключались и остающиеся долгопериодные вариации на масштабах десятилетий, которые аппроксимировались, в частности, квадратичными многочленами для анализируемого периода. Для полученных соответствующих переменных далее используются следующие обозначения:  $x_p$  – индекс ЭНЮК,  $x_A$  – индекс ЭАМ,  $x_I$  – индекс ИЗП, ИВП или ИОД.

Особенности анализируемых данных характеризуются на рис. 1: средние значения исходных ТПО (рис. 1а), сезонные среднеквадратические значения индексов  $x_p$ ,  $x_A$  и  $x_I$  (рис. 1б), а также автокорреляционные (АКФ) функции этих индексов (рис. 1в). Характерное время спада АКФ (до  $1/e$ ) для ЭНЮК равно 7 мес., для ЭАМ – 4 мес., для ИЗП – 5 мес., для ИВП – 4 мес., для ИОД – 3 мес.

Анализ взаимных корреляционных функций (ВКФ) позволяет выявить наличие связей (рис. 2), но не воздействие в конкретном направлении. Так, по виду ВКФ для ЭНЮК и ИВП можно



**Рис. 1.** Характеристики исследуемых рядов для индексов ЭНЮК, ЭАМ, ИОД, ИЗП, ИВП: средний многолетний годовой ход ТПО (а) и соответствующие среднеквадратические отклонения (б), автокорреляционные функции индексов от величины лага (в), нормированные ошибки прогноза индивидуальных сезонных АР моделей в зависимости от месяца (г).

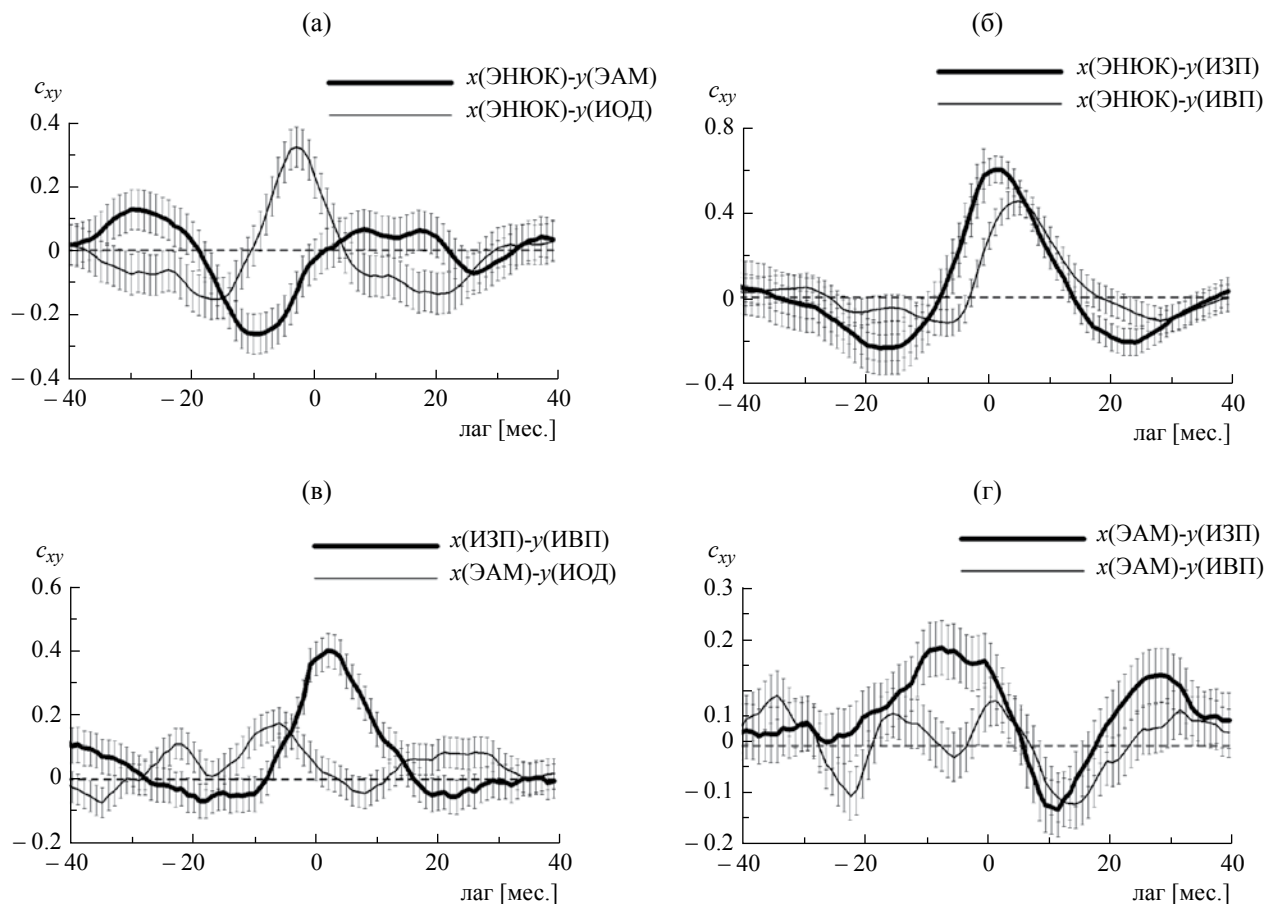
предположить одностороннее влияние ЭНЮК на ИВП (рис. 2б), а результаты проведенного в данной работе анализа направленных связей свидетельствуют и о сильном воздействии ИВП на ЭНЮК, при этом воздействия ЭНЮК и ИВП друг на друга разного знака.

### 3. МЕТОД АНАЛИЗА НАПРАВЛЕННЫХ СВЯЗЕЙ

Используемый метод оценки связей [32, 33] основан на анализе “причинности по Грейнджеру” или “причинности по Винеру–Грейнджеру” [20, 27–30]. В случае анализа двух процессов  $x_j$  и  $x_k$  воздействие процесса  $x_j$  на процесс  $x_k$  характеризуется как “степень зависимости” текущего значения  $x_k$  от предшествующих значений  $x_j$  при фиксированных предшествующих значениях  $x_k$ . Количественной мерой “направленной связи” является разность дисперсий ошибок прогноза двух эмпирических авторегрессионных (АР) моделей — с учетом и без учета  $x_j$ . Если учитывается третий процесс  $x_i$ , то обе ошибки прогноза рассчитываются для моделей с учетом  $x_i$ . Это приближает получаемую характеристику к оценке “прямого” влияния  $x_j$  на  $x_k$ , т.е. влияния не через цепочку

$x_j \rightarrow x_i \rightarrow x_k$ . Как и любой эмпирический подход, оценка причинности по Винеру–Грейнджеру не гарантирует выявление причинно-следственной связи [34, 35], но часто гораздо эффективнее, чем подход на основе анализа ВКФ. Возможности и особенности используемого метода рассмотрены, например, в [34–36].

Дисперсия ошибки прогноза процесса  $x_k$  с помощью индивидуальной АР модели, деленная на дисперсию  $x_k$ , обозначается  $\sigma_k^2$  с индексом  $k$ , характеризующим океанический бассейн, —  $P, A, I$  для ТО, АО, ИО соответственно. При анализе с выделением ИЗП и ИВП в ИО для индекса  $k$  используются соответствующие обозначения  $I_W$  и  $I_E$ . Порядок АР моделей определяется с помощью критерия Шварца [29, 30] и обозначается  $d_k$ . Использовались только линейные модели, так как для анализируемых относительно коротких рядов введение нелинейности приводит к снижению статистической значимости результатов и, затрудняя анализ, часто оставляет выводы без изменения [29, 30]. Для нормированных улучшений прогноза вводится обозначение  $G_{j \rightarrow k} = (\sigma_k^2 - \sigma_{k,j}^2) / \sigma_{k,j}^2$ , где  $j, k \in \{P, A, I\}, j \neq k$ ,  $\sigma_{k,j}^2$  — ошибка прогноза



**Рис. 2.** Взаимные корреляционные функции анализируемых временных рядов: между ЭНЮК и ЭАМ – жирная линия, ЭНЮК и ИОД – тонкая (а); между ЭНЮК и ИЗП – жирная линия, ЭНЮК и ИВП – тонкая (б); между ИЗП и ИВП – жирная линия, ЭАМ и ИОД – тонкая (в); между ЭАМ и ИЗП – жирная линия, ЭАМ и ИВП – тонкая (г). Вертикальные интервалы – стандартные отклонения оценок по формуле Бартлетта при учете автокорреляций.

двухкомпонентной АР модели процесса  $x_k$ , содержащей  $d_{k,j}$  предшествующих значений процесса  $x_j$ , а величина  $d_{k,j}$  определяется минимизацией оценки уровня статистической значимости  $p(G_{j \rightarrow k})$ , полученного по  $F$ -тесту с поправкой Бонферрони [29, 30, 37]. Чем меньше  $p(G_{j \rightarrow k})$  – оценка вероятности случайной ошибки, тем надежнее вывод о наличии воздействия  $j \rightarrow k$ . Значения  $G_{j \rightarrow k}$  характеризуют интенсивность воздействия  $j \rightarrow k$  [38] при условиях, подробно обсуждаемых в [35, 36]. Их для наглядности можно выражать в процентах. В рамках линейных АР моделей с учетом времени декорреляции анализируемых процессов (3–7 мес.) значения  $G_{j \rightarrow k}$  порядка нескольких процентов весьма существенны для наблюдаемой изменчивости и могут соответствовать в 5–6 раз большему одностороннему “долгосрочному эффекту” – увеличению дисперсии процесса  $x_k$  при введении связи  $j \rightarrow k$  в АР модель по сравнению со случаем отсутствия связей [39]. При анализе использовался коэффициент пропорциональности между  $G_{j \rightarrow k}$  и долгосрочным эффектом

в зависимости от времени декорреляции процессов, а также поправка на нелинейность этой зависимости при достаточно сильных связях [39].

При учете третьего процесса  $x_i$  для характеристики связи  $j \rightarrow k$  вводится обозначение  $G_{j \rightarrow k|i} = (\sigma_{k,i}^2 - \sigma_{k,i,j}^2) / \sigma_{k,i}^2$ , где  $\sigma_{k,i,j}^2$  – ошибка прогноза трехкомпонентной АР модели, содержащей  $d_{k,i,j}$  значений процесса  $x_j$ . Величина  $d_{k,i,j}$  определяется также путем минимизации оценки уровня значимости  $p(G_{j \rightarrow k|i})$ . В полученной АР модели воздействие  $j \rightarrow k$  может описываться не одним, а несколькими (если  $d_{k,i,j} > 1$ ) коэффициентами связи, которые могут иметь разный знак. В этом случае, чтобы охарактеризовать “знак” данной связи, целесообразно выделять максимальные по модулю коэффициенты связи, которые и представлены далее. По сравнению с двухкомпонентным анализом учет третьего процесса дает дополнительную информацию. Вывод о наличии “прямого” воздействия  $j \rightarrow k$  нельзя сделать, если незначима величина  $G_{j \rightarrow k|i}$ . С другой стороны,

при незначимой величине  $G_{j \rightarrow k}$  может быть значимой  $G_{j \rightarrow k|j}$ . Это реализуется, если воздействие  $j \rightarrow k$  осуществляется как “напрямую”, так и через процесс  $x_i$ , причем с разными знаками, так что суммарное воздействие слабо, или если  $x_j$  и  $x_i$  независимы друг от друга и оба влияют на процесс  $x_k$ . В этих двух случаях трехкомпонентный анализ имеет более высокую чувствительность для выявления связи по сравнению с двухкомпонентным.

При анализе без учета сезонной зависимости соответствующие характеристики связи далее называются несезонными. Если связи существенно зависят от сезона и имеют разный знак в разные сезоны, то несезонная (интегральная) оценка  $G_{j \rightarrow k}$  может оказаться почти нулевой, и связь не будет выявлена. Для рассматриваемых в данной работе процессов сезонная зависимость связей и индивидуальных параметров может быть сильной из-за годового хода средних климатологических характеристик, например, глубины океанского термоклина.

Для получения характеристик связи с учетом сезонной зависимости с периодом  $T$  (шагов дискретного времени) применялся модифицированный метод [40], в котором предсказываемые значения процесса  $x_k$  соответствовали выбранному сезону  $\tau$  и анализ проводился отдельно для каждого  $\tau$  от 1 до  $T$ . При анализе среднемесячных данных  $T = 12$  (от января до декабря), при сезонном (трехмесячном) осреднении данных  $T = 4$  (при этом сезоны в тропических широтах определялись как для Северного полушария: зима – с декабря по февраль, весна – с марта по май, лето – с июня по август, осень – с сентября по ноябрь), для данных с полугодовым осреднением (интервалы с ноября по апрель и с мая по октябрь)  $T = 2$ . При этом все характеристики определялись как функции  $\tau$ :  $d_k(\tau)$ ,  $d_{k,j}(\tau)$ ,  $G_{j \rightarrow k}(\tau)$ ,  $p(G_{j \rightarrow k}(\tau))$ ,  $d_{k,i,j}(\tau)$ ,  $G_{j \rightarrow k|i}(\tau)$ ,  $p(G_{j \rightarrow k|i}(\tau))$  при учете дополнительной поправки Бонферрони на перебор различных  $\tau$ . Вывод о ненулевом  $G_{j \rightarrow k}(\tau)$  делается на итоговом уровне значимости  $p$ , если поточечный уровень значимости  $p(G_{j \rightarrow k}(\tau))$  меньше, чем  $p/T$ .

Достаточно надежными обычно считаются выводы с итоговым уровнем значимости  $p \leq 0.05$ . В случае очень малых  $p \ll 10^{-4}$  далее лишь указывается, что  $p < 10^{-4}$  (надежный вывод).

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ

Основные результаты представлены для самого детального – месячного – разрешения. Наряду с этим проводился анализ при трех- и шестимесячном разрешении, поскольку более грубое разрешение может быть полезным, если связи проявляются лишь на больших интервалах времени. Его результаты представлены выборочно.

Для представления точности прогнозов полученных АР моделей на рис. 1г приведены сезонные зависимости ошибок прогноза индивидуальных АР моделей. Минимальны ошибки прогноза для индекса ЭНЮК, максимальны – для индексов ИО.

#### 4.1. Оценки взаимного влияния АО и ТО

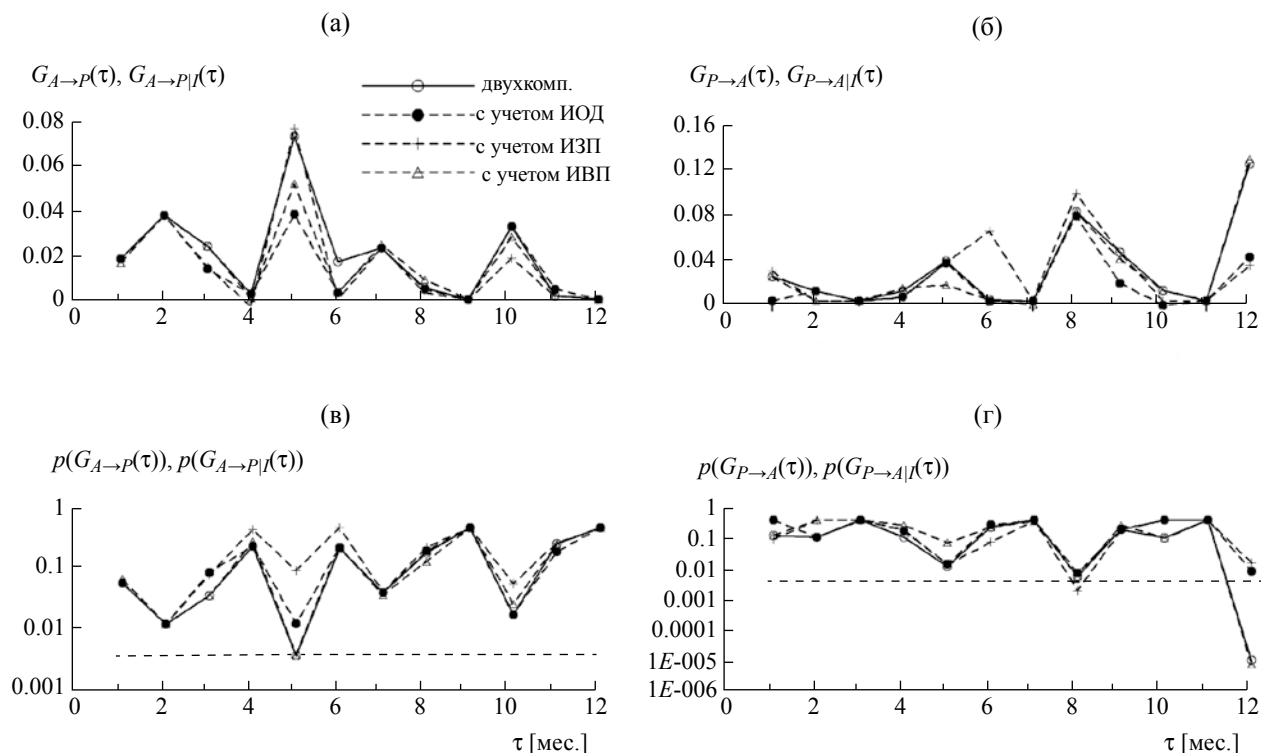
При несезонном двухкомпонентном анализе по ежемесячным данным проявляется статистически значимое влияние ЭАМ на ЭНЮК ( $G_{A \rightarrow P} = 2\%$ ) с инерционностью  $d_{P,A} = 2$  мес. и отрицательным коэффициентом связи ( $-0.14$  при лаге в 2 мес.). Согласно [39] с учетом времен декорреляции  $7\Delta t$  для  $x_P$  и  $3\Delta t$  для  $x_A$  долгосрочный эффект связи  $A \rightarrow P$  (односторонний вклад  $x_A$  в дисперсию  $x_P$ ) оценен как  $6 \cdot G_{A \rightarrow P} \approx 12\%$ . Аналогичны результаты трехкомпонентного анализа с учетом  $x_I$ . При использовании в качестве  $x_I$  индекса ИОД нет различий между  $G_{A \rightarrow P}$  и  $G_{A \rightarrow P|I}$ . При использовании индексов ИЗП или ИВП получено  $G_{A \rightarrow P|I} = 1.6\%$  с односторонним вкладом  $x_A$  в дисперсию  $x_P$ , оцененным равным 10%. Это мало отличается от результатов двухкомпонентного анализа.

При учете сезонной зависимости (рис. 3а, 3в) статистическая значимость всех оценок воздействия ЭАМ на ЭНЮК не так высока, что связано с сокращением объема данных. При двухкомпонентном анализе отмечено статистически значимое влияние ЭАМ на майский режим ЭНЮК:  $G_{A \rightarrow P} = 7\%$ , итоговый уровень значимости  $p(G_{A \rightarrow P}) = 0.05$ , инерционность – 1 мес., коэффициент связи – 0.24 с погрешностью 0.22. При учете индекса ИЗП или ИОД и влияние на майский режим ЭНЮК становится незначимым (рис. 3б, 3г), но при анализе данных с трехмесячным разрешением получена статистически значимая оценка влияния ЭАМ на весенний режим ЭНЮК даже при учете индексов ИЗП или ИОД.

Таким образом, согласно полученным результатам проявляется воздействие ЭАМ на ЭНЮК с инерционностью 2 мес., отрицательным коэффициентом связи и максимумом в весенний сезон, почти не зависящее от состояния ИО. Оно может обуславливать до 10% дисперсии индекса  $x_P$ .

Воздействие ЭНЮК на ЭАМ при несезонном двух- и трехкомпонентном анализе данных с месячным (и с более грубым) разрешением не выявлено. Это свидетельствует в пользу однонаправленной связи между ЭАМ и ЭНЮК, отмечавшейся в [20, 22, 23].

При сезонном двухкомпонентном анализе результаты в целом подобные, за одним исключением. Значима зависимость декабрьского  $x_A$  от ноябрьского индекса  $x_P$  (рис. 3в):  $G_{P \rightarrow A}(12) = 12\%$ , итоговый



**Рис. 3.** Сезонный анализ связей между ЭНЮК и ЭАМ при месячном разрешении: а, б – характеристики связи (нормированные улучшения прогноза), в, г – соответствующие оценки поточечного (для каждого отдельного месяца) уровня значимости, горизонтальная штриховая линия – уровень 0.004, соответствующий итоговому уровню значимости 0.05. Левая колонка (а, в) – оценки влияния ЭАМ на ЭНЮК, правая (б, г) – ЭНЮК на ЭАМ.

уровень  $p(G_{P \rightarrow A}) < 0.002$ , инерционность 1 мес., коэффициент связи 0.09 с погрешностью 0.02. Однако эта зависимость незначима при учете индексов ИЗП или ИОД и, следовательно, может быть обусловлена влиянием ИО на ЭНЮК и ЭАМ.

#### 4.2. Оценки взаимного влияния АО и ИО

При несезонном анализе ежемесячных данных статистически значимо проявляется зависимость ЭАМ от индекса ИОД ( $G_{I \rightarrow A} = 0.3\%$ ,  $p = 0.02$ ) и несколько слабее от индекса ИЗП ( $G_{I \rightarrow A} = 0.2\%$ ,  $p = 0.05$ ), хотя обе зависимости достаточно слабые. При этом они проявляются заметно сильнее при анализе данных с трехмесячным разрешением: влияние ИОД с  $G_{I \rightarrow A} = 1.7\%$ , положительным коэффициентом связи и инерционностью 3 мес. значимо на уровне  $p = 0.001$ ; влияние ИЗП аналогично по силе, но более инерционно (6 мес.) и менее значимо ( $p = 0.007$ ). Отмеченные характеристики инерционности свидетельствуют о том, что эта связь осуществляется на масштабах времени, больших одного месяца. Учет ЭНЮК не меняет эти результаты. Следует отметить, что зависимость индекса ЭАМ от индексов ИО (особенно от ИОД) установлена надежно в отличие от зависимости ЭАМ от ЭНЮК.

При сезонном двухкомпонентном анализе получена значимая оценка влияния ИЗП на декабрьский режим ЭАМ:  $G_{I \rightarrow A}(12) = 10\%$ ,  $p(G_{I \rightarrow A}) < 0.0001$ , инерционность 1 мес. Значима и близка по величине оценка влияния ИЗП на октябрьский режим ЭАМ. Несколько меньше влияние ИОД на ЭАМ. При сезонном трехкомпонентном анализе с учетом ЭНЮК эти влияния становятся незначимыми, аналогично тому, как незначимым становится влияние ЭНЮК на ЭАМ при учете режима ИЗП или ИОД. Однако при анализе данных с трехмесячным разрешением зависимости зимнего режима ЭАМ от индексов ИЗП и ИОД при учете ЭНЮК становятся ближе к значимым (хотя всего лишь на уровне  $p = 0.1$ ), а при полугодовом разрешении влияние ИЗП на режим ЭАМ в ноябре–апреле значимо на уровне 0.01 и при учете индекса ЭНЮК.

Следует отметить, что воздействие ИО на ЭАМ выявляется более устойчиво при разном временном разрешении, чем воздействие ТО на ЭАМ. Наряду с выявленным значимым воздействием ИОД (ИЗП) на ЭАМ при несезонном трехкомпонентном анализе, это свидетельствует о том, что проявляется воздействие ИОД (ИЗП) на ЭАМ. Зимний же режим ЭАМ сильно зависит от индексов ИО, или от ЭНЮК, или от обоих этих факторов, что по

имеющимся данным нельзя установить точнее из-за корреляции индексов ЭНЮК и ИО.

Что касается воздействия ЭАМ на процессы в ИО, то при несезонном двухкомпонентном анализе оно не проявляется, однако при учете ЭНЮК проявляется зависимость ИЗП от ЭАМ ( $G_{A \rightarrow I|P} = 0.5\%$ ,  $p = 0.002$ ) и несколько более слабая зависимость ИВП от ЭАМ ( $G_{A \rightarrow I|P} = 0.3\%$ ,  $p = 0.03$ ). При этом воздействия ЭАМ на регионы ИЗП и ИВП имеют одинаковый положительный знак и близкие коэффициенты связи. Зависимость индекса ИОД от ЭАМ отсутствует при любом временном разрешении. Согласно этим результатам рост индекса ЭАМ приводит к слабому, примерно одинаковому в ИЗП и ИВП увеличению ТПО в экваториальной части ИО, не влияя на индекс ИОД. Связи, действительно, слабые – представленное улучшение прогноза ЭАМ при учете индекса ИЗП соответствует оценке долгосрочного вклада этой связи в дисперсию ИЗП не более 2%. При сезонном анализе зависимость процессов в ИО от ЭАМ незначима.

#### 4.3. Оценки взаимного влияния ТО и ИО

При двухкомпонентном несезонном анализе по ежемесячным данным проявляется сильное воздействие ЭНЮК на индоокеанские процессы, особенно на западный полюс диполя:  $G_{P \rightarrow I} \approx 8\%$ ,  $p < 10^{-4}$ , инерционность 1 мес. Оценка одностроннего долгосрочного вклада [39] ЭНЮК в дисперсию индекса ИЗП составляет 35%. Воздействие ЭНЮК на восточный полюс диполя несколько слабее:  $G_{P \rightarrow I} \approx 5\%$ ,  $p < 10^{-4}$ , инерционность 3 мес., долгосрочный вклад ЭНЮК в дисперсию индекса ИВП оценивается в 25%. Оба воздействия – с положительным коэффициентом связи. Воздействие ЭНЮК на индекс ИОД слабое:  $G_{P \rightarrow I} < 1\%$  и значимость не так высока –  $p = 0.04$ .

При сезонном анализе проявляется существенное влияние ЭНЮК на индоокеанские процессы, характеризующиеся тремя использовавшимися индексами. В целом самое сильное воздействие выявлено на область ИЗП. Оно статистически значимо во все месяцы, за исключением июля. Максимально – в октябре ( $G_{P \rightarrow I}(10) = 23\%$ ,  $p < 10^{-4}$ , инерционность 1 мес., коэффициент связи 0.12 с погрешностью 0.02). В зимние месяцы воздействие ЭНЮК на область ИЗП меньше, при этом проявляется сильное воздействие ЭНЮК на область ИВП, которое значимо с ноября по апрель, но максимально зимой. Максимальное значение достигается в январе ( $G_{I \rightarrow P}(1) = 25\%$ ,  $p < 10^{-4}$ , инерционность 1 мес., коэффициент связи 0.13 с погрешностью 0.02).

Влияние ЭНЮК на индекс ИОД слабее, проявляется с августа по октябрь с максимумом

в октябре ( $G_{P \rightarrow I}(10) = 11\%$ ,  $p = 0.0003$ , инерционность 1 мес., коэффициент связи 0.13 с погрешностью 0.03). При этом последнее проявляется за счет воздействия ЭНЮК на область ИЗП, а не на область ИВП. Более грубое временное разрешение дает те же результаты, подтверждая непрерывное воздействие ЭНЮК на ИЗП с максимальной силой воздействия на осенний режим ИЗП, а также воздействие ЭНЮК на зимний режим ИВП и на осенний режим ИОД. При трехкомпонентном анализе с учетом ЭАМ оценки практически не меняются. В целом проявляется сильное воздействие ЭНЮК на режим ТПО в Индийском океане. При этом в дополнение к несезонному анализу, выявившему более сильное воздействие на область ИЗП, сезонные оценки свидетельствуют, что воздействие ЭНЮК с весны до осени значительно сильнее осуществляется на область ИЗП, а зимой – на ИВП.

Воздействие индоокеанских процессов на ЭНЮК проявляется при несезонном двухкомпонентном анализе по ежемесячным данным: сильнее всего влияние ИВП:  $G_{I \rightarrow P} \approx 4\%$ ,  $p < 10^{-4}$ , инерционность 5 мес., с отрицательным знаком. При этом односторонний вклад вариаций ТПО в области ИВП в дисперсию индекса ЭНЮК оценивается в 20%. Слабее проявляется зависимость ЭНЮК от индекса ИОД:  $G_{I \rightarrow P} \approx 2\%$ ,  $p < 10^{-4}$ , инерционность 6 мес. Еще слабее воздействие ИЗП –  $G_{I \rightarrow P} \approx 1\%$ ,  $p = 0.001$ . Несезонный трехкомпонентный анализ с учетом ЭАМ дает близкие результаты с некоторым уменьшением оценок силы воздействия.

Сезонный анализ выявил наиболее сильное воздействие индоокеанских процессов на ЭНЮК при использовании индекса ИВП: это влияние на августовский режим ЭНЮК ( $G_{I \rightarrow P} = 9\%$ ,  $p = 0.01$ , инерционность 2 мес., коэффициент связи с лагом 2 мес. равен  $-0.4$  с оценкой погрешности 0.13) и на июньский режим ( $G_{I \rightarrow P} = 5\%$ ,  $p = 0.05$ , инерционность 1 мес., коэффициент связи  $-0.32$  с оценкой погрешности 0.11). Это воздействие проявляется и при учете ЭАМ. Несколько менее значимо и более инерционно воздействие ИЗП на майский и июньский режим ЭНЮК, но оно становится незначимым при учете ЭАМ. Зависимости ЭНЮК от индекса ИОД при сезонном анализе не выявлено.

#### 4.4. Анализ связей с одновременным учетом индексов ИЗП и ИВП

Для характеристики роли каждого из полюсов ИОД, а также индекса ИОД и средней ТПО для ИВП и ИЗП (обозначим ее ИОД(с)) проводился анализ троек ЭНЮК – ИВП – ИЗП, ЭНЮК – ИОД – ИОД(с), ЭАМ – ИВП – ИЗП, ЭАМ – ИОД – ИОД(с).

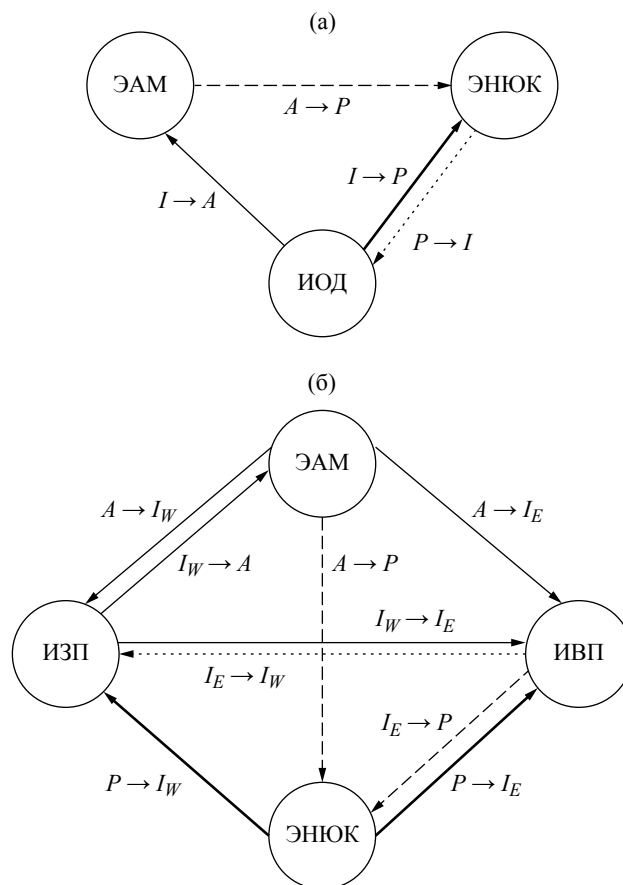
При несезонном анализе подтверждено, что при учете ИВП не проявляется зависимость ЭНЮК от ИЗП и других индексов ИО. Полученные результаты свидетельствуют о том, что ИО влияет на ЭНЮК только через восточный полюс. Это подтверждено и при сезонном анализе с месячным разрешением. Только при трехмесячном и полугодовом разрешении проявляется и воздействие ИЗП на ЭНЮК (преимущественно на летний режим).

Что касается связей в пределах ИО, то полученные оценки свидетельствуют о воздействии ИВП на ИЗП с отрицательным знаком, а ИЗП на ИВП – с положительным. Проявляется также воздействие ИОД на ИОД(с) с положительным знаком и воздействие ИОД(с) на ИОД – с отрицательным. Эти межрегиональные взаимодействия в пределах ИО не очень сильны – они слабее, чем взаимодействие отдельных областей ИО с ЭНЮК. При этом они сильнее, чем связи ИО с ЭАМ. Их учет в целом не влияет на сделанные выше выводы с отмеченной разной ролью индексов ИЗП, ИВП и ИОД как индикаторов процессов в областях экваториального Индийского океана при анализе связей с процессами в экваториальных областях Тихого и Атлантического океанов.

#### 4.5. Общая схема ключевых связей

На рис. 4а, 4б представлена схема, характеризующая основные, наиболее значимые и устойчивые связи, выявленные в данной работе. Стрелками показаны направления связей, толщина линий качественно характеризует относительную силу связей. В таблице отмечены значения  $G_{j \rightarrow ki}$  для прогноза на месяц вперед, уровень значимости  $p(G_{j \rightarrow ki})$ , максимальный по модулю коэффициент связи в АР модели ( $a_{\max}$ ), инерционность связи (количество коэффициентов связи  $d_{k,i,j}$ , умноженное на  $\Delta t = 1$  мес.) и сезон максимального проявления.

Наиболее сильные связи выявлены между ЭНЮК и индоокеанскими процессами. Явления Эль-Ниньо приводят к повышению температуры как в области ИЗП, так и в области ИВП (рис. 4б). При этом сначала растет ТПО в области ИЗП (инерционность 1 мес., влияние максимально проявляется в осенний сезон, хотя велико и в другие сезоны). После этого растет ТПО в области ИВП (инерционность связи 3 мес., влияние максимально проявляется в зимний сезон). При этом ТПО в области ИВП растет как под “прямым” действием ЭНЮК, так и под воздействием со стороны ИЗП. Влияние ЭНЮК на индекс ИОД намного слабее (рис. 4а). Это указывает на то, что Эль-Ниньо способствует относительно однородному повышению ТПО в экваториальном ИО, а не изменению ее зонального градиента. В свою очередь, повышение температуры в области ИВП сильно влияет на ТПО в области формирования



**Рис. 4.** Схемы выявленных связей между вариациями ТПО тропических океанов – Тихого ( $P$ ), Атлантического ( $A$ ) и Индийского ( $I$ ): при использовании ИОД (а) или ИЗП и ИВП (б) для характеристики процессов в Индийском океане. Сплошные линии характеризуют воздействия с положительными коэффициентами связи, штриховые – с отрицательными, пунктирная ( $P \rightarrow I$ ) – с коэффициентами связи разного знака, сумма которых близка к нулю. Толстые линии характеризуют наиболее значимые связи: ЭАМ и ИОД на ЭНЮК (а), ЭНЮК на ИЗП и ИВП (и немного более слабые – ЭАМ и ИВП на ЭНЮК) (б). Количественные характеристики связей приведены в таблице.

Эль-Ниньо (в области Ниньо-3,4 влияние максимально для летнего сезона) с отрицательным коэффициентом связи. Это должно способствовать формированию режима типа Ла-Нинья с отрицательными аномалиями ТПО в экваториальных областях ТО. Воздействие ИО на ЭНЮК осуществляется через вариации ТПО в области ИВП (рис. 4б). Согласно полученным оценкам долгосрочных эффектов (односторонних) [39] влияние ЭНЮК может обуславливать до 35% дисперсии для индекса ИЗП и 25% дисперсии для индекса ИВП. Влияние вариаций ТПО в области ИВП в свою очередь может обуславливать до 20% дисперсии индекса ЭНЮК.

Взаимодействие ЭАМ с отмеченными процессами проявляется значительно слабее. Заметно



Характеристики основных выявленных связей

	$G_{i \rightarrow j k}$ , %	$p(G_{i \rightarrow j k})$	$a_{\max}$	Инерционность, мес.	Сезон максимума
$A \rightarrow P$	<b>1.6</b>	< <b>0.0001</b>	<b><math>-0.13 \pm 0.06</math></b>	<b>2</b>	<b>весна СП</b>
$I \rightarrow P$	<b>1.8</b>	< <b>0.0001</b>	<b><math>0.14 \pm 0.05</math></b>	<b>1</b>	—
$I_W \rightarrow P$	0.6	0.02	$-0.11 \pm 0.10$	3	—
$I_E \rightarrow P$	<b>3.6</b>	< <b>0.0001</b>	<b><math>-0.12 \pm 0.08</math></b>	<b>5</b>	<b>лето СП</b>
$P \rightarrow I$	0.7	0.04	среди шести коэффициентов связи нет явного максимального	6	осень СП
$P \rightarrow I_W$	<b>7.5</b>	< <b>0.0001</b>	<b><math>0.07 \pm 0.01</math></b>	<b>1</b>	<b>осень СП</b>
$P \rightarrow I_E$	<b>5.3</b>	< <b>0.0001</b>	<b><math>0.04 \pm 0.03</math></b>	<b>3</b>	<b>зима СП</b>
$I \rightarrow A$	0.4	0.01	$0.05 \pm 0.04$	1	зима СП
$I_W \rightarrow A$	0.2	0.05	$0.04 \pm 0.04$	1	зима СП
$A \rightarrow I_W$	0.5	0.002	$0.03 \pm 0.02$	1	—
$A \rightarrow I_E$	0.3	0.03	$0.02 \pm 0.02$	1	—

Примечания. Улучшение прогноза на месяц вперед при несезонном трехкомпонентном анализе  $G_{i \rightarrow j|k}$ , уровень значимости  $p(G_{i \rightarrow j|k})$ , максимальный по модулю коэффициент связи в АР модели  $a_{\max}$  с 95%-ным доверительным интервалом, инерционность связи, сезон максимального проявления связи (прочерк означает отсутствие явного максимума при сезонном анализе). Выделены наиболее значимые связи (соответствующие толстым стрелкам на рис. 4).

проявляется лишь воздействие ЭАМ на режим ЭНЮК (максимально весной) с инерционностью 2 мес. и отрицательным коэффициентом связи, т.е. рост ТПО в восточной экваториальной Атлантике способствует проявлению особенностей, характерных для явлений Ла-Нинья в ТО. При этом вклад ЭАМ (односторонний) в дисперсию индекса ЭНЮК оценивается около 10%. Воздействие ЭАМ на ИЗП и ИВП гораздо слабее (рис. 4б): менее 1% улучшения месячного прогноза и односторонний вклад в дисперсию не более 2–3%, без явных максимумов в годовом ходе, положительные коэффициенты связи (рост ТПО в Атлантике вызывает слабый рост ТПО как в ИЗП, так и в ИВП).

При несезонном анализе проявляется влияние ИОД (рис. 4а) и чуть слабее ИЗП (рис. 4б) на ЭАМ. Это влияние с положительным коэффициентом связи, его односторонний вклад в дисперсию ЭАМ не более 2–3%. Влияние же ЭНЮК на ЭАМ не проявляется при несезонном анализе.

Отмечена зависимость зимнего режима ЭАМ от ЭНЮК либо от ИОД (или ИЗП). Высокая корреляция между зимними индексами ЭНЮК и ИЗП затрудняет выделение предпочтительного процесса взаимодействия по имеющимся данным. При этом среднее для всех сезонов воздействие ИОД (ИЗП) и ЭНЮК на ЭАМ в любом случае проявляется слабо (рис. 4а, 4б).

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные новые результаты подтверждают не все ранее предложенные гипотезы, механизмы и оценки связей, существенно детализируя оценки связей в тропических широтах трех океанов с учетом сезонной зависимости. Подтверждено наличие воздействия ЭАМ на ЭНЮК с отрицательным коэффициентом связи, как в [20, 22, 23]. При сезонном анализе выявлено, что это воздействие максимально в весенний сезон Северного полушария. Воздействие ЭНЮК на ЭАМ не выявлено в среднем для всех сезонов в отличие от [12, 14], а воздействие ИО на ЭАМ проявляется, хотя и относительно слабое. Отмечено, что в зимний сезон проявляется зависимость ЭАМ от ИОД (ИЗП) либо от ЭНЮК, либо от обоих этих процессов. Полученные результаты свидетельствуют лишь о достаточно слабых воздействиях ЭАМ на индоокеанские процессы.

Подтверждено многократно отмеченное ранее воздействие ЭНЮК на индоокеанские процессы. При этом выявлено более сильное воздействие ЭНЮК на ИЗП, а также воздействие режимов ИВП и ИОД на ЭНЮК. Воздействие ЭНЮК на ИОД оценено как слабое и не выделено среди основных результатов (в отличие от [22, 24]). Несколько большую роль этого воздействия в [22, 24] естественно связать с отличием методов анализа и меньшим объемом

анализировавшихся данных. В данной работе при анализе использовались АР модели с оптимально подстраиваемой размерностью, а не с заданной априори размерностью 1 или 2, а анализировавшийся временной интервал в три раза больше, чем в [22]. Наряду с этим в данной работе оценивается значимость выводов, тогда как в [24] приводятся лишь точечные оценки. В отношении сезонной зависимости согласно полученным результатам наиболее сильно воздействие ЭНЮК на осенний (для Северного полушария) режим ИЗП и затем на зимний режим ИВП. Обратное воздействие индоокеанских процессов на ЭНЮК осуществляется через вариации ТПО в области ИВП с максимумом летом.

Таким образом, в результате сезонного трехкомпонентного анализа получены дополнительные характеристики связей между ЭНЮК, ЭАМ и ИОД (ИЗП, ИВП) по сравнению с предыдущими работами. Среди полученных результатов в качестве основных можно выделить сезонные характеристики воздействий ЭАМ на ЭНЮК, ЭНЮК на режим ИЗП и ИВП, режима ИВП на ЭНЮК, режимов ИЗП и ИОД на ЭАМ.

Сезонный анализ связей проведен при поддержке Правительства РФ (соглашение № 14.Z50.31.0033 с ИПФ РАН). Несезонные характеристики связей получены в рамках проектов, поддержанных РАН и РФФИ (гранты №№ 14-02-00492, 17-05-01097). Вихреволновые особенности исследовавшихся процессов анализировались в рамках проекта РНФ (грант № 14-17-00806).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds: T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner et al. Cambridge Univ. Press, Cambridge/New York. 2013. 1535 p.
- Chang P., Yamagata T.Y., Schopf P. et al. Climate fluctuations of tropical coupled systems – the role of ocean dynamics // J. Climate. 2006. V. 19. P. 5122–5174.
- Арне К., Бенгтссон Л., Голицын Г.С. и др. Анализ и моделирование изменений гидрологического режима в бассейне Каспийского моря // ДАН. 1999. Т. 366. № 2. С. 248–252.
- Бышев В.И. Синоптическая и крупномасштабная изменчивость океана и атмосферы. М.: Наука, 2003. 343 с.
- Мохов И.И., Хон В.Ч. Межгодовая изменчивость и долгопериодные тенденции изменений центров действия атмосферы в Северном полушарии. Анализ данных наблюдений // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2005. Т. 41. № 6. С. 723–732.
- Мохов И.И. Особенности формирования летней жары 2010 г. на Европейской территории России в контексте общих изменений климата и его аномалий // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47. № 6. С. 709–716.
- Мохов И.И., Добрышман Е.М., Макарова М.Е. Трансформирование тропических циклонов во внетропические: тенденции изменений в 1970–2012 гг. // ДАН. 2014. Т. 454. № 2. С. 216–220.
- Мохов И.И., Тимажеев А.В. Оценки предсказуемости климатических аномалий в российских регионах в связи с явлениями Эль-Ниньо // ДАН. 2015. Т. 464. № 6. С. 722–726.
- Merle J. Variabilité thermique annuelle et interannuelle de l'océan Atlantique équatorial Est. L'hypothèse d'un "El Niño" Atlantique // Oceanol. Acta. 1980. V. 3. P. 209–220.
- Zebiak S.E. Air-sea interaction in the equatorial Atlantic region // J. Climate. 1993. V. 6. P. 1567–1586.
- Saji N.H., Goswami B.N., Vinayachandran P.N., Yamagata T. A dipole mode in the tropical Indian Ocean // Nature. 1999. V. 401. P. 360–363.
- Latif M., Barnett T.P. Interaction of the tropical oceans // J. Climate. 1995. V. 8. P. 952–964.
- Enfield D.B., Mayer D.A. Tropical Atlantic sea surface temperature variability and its relation to El Niño – Southern Oscillation // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. P. 929–945.
- Latif M., Groetzner A. The equatorial Atlantic oscillation and its response to ENSO // Clim. Dyn. 2000. V. 16. P. 213–218.
- Ruiz-Barradas A., Carton J.A., Nigam S. Role of the atmosphere in climate variability of the tropical Atlantic // J. Climate. 2003. V. 16. P. 2052–2065.
- Xie S.-P., Carton J.A. Tropical Atlantic variability: Patterns, mechanisms, and impacts / Earth Climate: The Ocean-Atmosphere Interaction / Eds: S. Wang, S.-P. Xie, J.A. Carton. Geophys. Monogr. Ser. V. 147. AGU, Washington, D.C., 2004. P. 121–142.
- Wang C. ENSO, Atlantic climate variability, and the Walker and Hadley circulations // The Hadley Circulation: Present, Past and Future / Eds: H.F. Diaz, R.S. Bradley. Dordrecht: Kluwer Acad. Publ. 2005. P. 173–202.
- Deser C., Capotondi A., Saravanan R., Phillips A.S. Tropical Pacific and Atlantic climate variability in CCSM3 // J. Climate. 2006. V. 19. P. 2451–2481.
- Chang P., Fang Y., Saravanan R., Ji L., Seidel H. The cause of the fragile relationship between the Pacific El Niño and the Atlantic Niño // Nature. 2006. V. 443. P. 324–328.
- Козленко С.С., Мохов И.И., Смирнов Д.А. Анализ причинно-следственных связей между Эль-Ниньо в Тихом океане и его аналогом в экваториальной Атлантике // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 6. С. 754–763.
- Wang C., Kucharski F., Barimalala R., Bracco A. Teleconnections of the tropical Atlantic to the tropical Indian and Pacific Oceans: a review of recent findings // Meteorol. Z. 2009. V. 18. № 4. P. 445–454.
- Jansen M.F., Dommenges D., Keenlyside N. Tropical atmosphere–ocean interactions in a conceptual framework // J. Climate. 2009. V. 22. P. 550–567.
- Ding H., Keenlyside N., Latif M. Impact of the equatorial Atlantic on the El Niño Southern Oscillation // Clim. Dyn. 2012. V. 38. P. 1965–1972.

24. *San Liang X.* Unraveling the cause-effect relation between time series // *Physical Review E*. 2014. V. 90. 052150.
25. *Bjerknes J.* A possible response of the atmospheric Hadley circulation to equatorial anomalies of ocean temperature // *Tellus*. 1966. V. 18. P. 820–829.
26. *Bjerknes J.* Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific // *J. Phys. Oceanogr.* 1969. V. 97. № 3. P. 163–172.
27. *Mokhov I.I., Smirnov D.A.* El Nino Southern Oscillation drives North Atlantic Oscillation as revealed with non-linear techniques from climatic indices // *Geophys. Res. Lett.* 2006. V. 33. L03708, doi:10.1029/2005GL024557.
28. *Мохов И.И., Смирнов Д.А.* Исследование взаимного влияния процессов Эль-Ниньо – Южное колебание и Северо-Атлантического и Арктического колебаний нелинейными методами // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2006. Т. 42. № 5. С. 650–667.
29. *Mokhov I.I., Smirnov D.A., Nakonechny P.I. et al.* Alternating mutual influence of El-Nino/Southern Oscillation and Indian monsoon // *Geophys. Res. Lett.* 2011. V. 38. L00F04. doi:10.1029/2010GL045932.
30. *Мохов И.И., Смирнов Д.А., Наконечный П.И. и др.* Взаимосвязь явлений Эль-Ниньо – Южное колебание и индийского муссона // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2012. Т. 48. № 1. С. 56–66.
31. *Runge J., Kurths J., Petoukhov V.* Quantifying the strength and delay of climatic interactions: The ambiguities of cross correlation and a novel measure based on graphical models. // *J. Climate*. 2014. V. 27. P. 720–739.
32. *Wiener N.* Theory of prediction / In: *Modern Mathematics for the Engineer* / Ed. E.F. Beckenbach, New York: McGraw-Hill, 1956. P. 166–186.
33. *Granger C.W.J.* Investigating causal relations by econometric models and cross-spectral methods // *Econometrica*. 1969. V. 37. № 3. P. 424–438.
34. *Smirnov D.A., Bezruchko B.P.* Spurious causalities due to low temporal resolution: Towards detection of bidirectional coupling from time series // *Europhys. Lett.* 2012. V. 100. 10005.
35. *Smirnov D.A.* Spurious causalities with transfer entropy // *Phys. Rev. E*. 2013. V. 87. 042917.
36. *Смирнов Д.А., Мохов И.И.* Оценка взаимодействия климатических процессов: эффект редкой выборки рядов анализируемых данных // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2013. Т. 49. № 5. С. 530–539.
37. *Леман Э.* Проверка статистических гипотез. М.: Наука, 1979. 408 с.
38. *Smirnov D.A.* Quantifying causal couplings via dynamical effects: A unifying perspective // *Phys. Rev. E*. 2014. V. 90, 062921.
39. *Smirnov D.A., Mokhov I.I.* Relating Granger causality to long-term causal effects // *Phys. Rev. E*. 2015. V. 92, 042138.
40. *Мохов И.И., Смирнов Д.А.* Трехкомпонентный анализ сезонных особенностей взаимосвязи между явлениями Эль-Ниньо, Северо-Атлантическим колебанием и индийским муссоном // *Метеорология и гидрология*. 2016. № 12. С. 18–32.

## Estimates of Mutual Influences between Sea Surface Temperature Variations in Tropical Pacific, Atlantic, and Indian Oceans from Long-Period Data Series

I. I. Mokhov<sup>1,2,\*</sup>, D.A. Smirnov<sup>3,4,\*\*</sup>

<sup>1</sup>*A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS  
3 Pyzhevsky, 119017 Moscow  
\*E-mail: mokhov@ifaran.ru*

<sup>2</sup>*Lomonosov Moscow State University  
Leninskie Gory 119991 Moscow*

<sup>3</sup>*Saratov Branch of V.A. Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS  
38 Zelyonaya, 410019 Saratov*

<sup>4</sup>*Institute of Applied Physics RAS  
46 Ulyanova 603950 Nizhny Novgorod  
\*\*E-mail: smirnovda@yandex.ru*

Based on the concept of the Wiener – Granger causality, we have performed seasonal trivariate analysis of directional couplings between sea surface temperature variations in tropical Pacific, Atlantic, and Indian oceans. These variations are related to significant modes of regional and global climatic variability. We have analyzed time series of monthly indices of Pacific Ocean processes El-Nino/Southern Oscillation (ENSO), equatorial Atlantic mode (EAM), and Indian Ocean Dipole (IOD) along with its western and eastern poles for the period of 1870–2015. We have developed a scheme of interactions between the processes under study where coupling strength estimates are presented along with estimates of the season of its maximal value and the coupling coefficient sign. As the most significant couplings we have found seasonal influences of ENSO on the western and eastern poles of IOD, the eastern pole of IOD on ENSO, EAM on ENSO, and IOD on EAM.

**Keywords:** El Nino/Southern Oscillation, equatorial Atlantic mode, Indian Ocean Dipole, time series analysis, Wiener – Granger causality, seasonal analysis of directional couplings.